

**И.С. Свинцов, А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов,
Э.М. Горбунова, Н.В. Кабыченко**

ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД*

Исследовано состояние флюидонасыщенного коллектора на основе сравнительного анализа полусуточных и суточных приливных волн, выделенных в смещении грунта и уровне подземных вод, по результатам сейсмических и прецизионных гидрогеологических наблюдений, проводимых на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево». На примере совместной обработки полученных экспериментальных данных с теоретически рассчитанными значениями смещения грунта показана информативность применения данного метода для определения интервалов, осложненных влиянием дополнительных (сейсмических, гидродинамических) факторов, и участков, характеризующихся относительно стабильными квазистационарными условиями фильтрации подземных вод, соответствующих пороугрулой деформации коллектора.

Ключевые слова: флюидонасыщенный коллектор, прецизионный мониторинг, уровень подземных вод, приливные волны, смещение грунта, фазовый сдвиг, депрессионная воронка.

Введение

Иntenсификация антропогенной нагрузки на геологическую среду и подземные воды приводит к негативным и необратимым последствиям изменения состояния массива горных пород, связанным с активизацией экзогенных (карстово-суффозионных, оползневых) и природно-техногенных процессов. С 2006 г. череда техногенных аварий, зарегистрированных в Пермском крае, вызвана затоплением калийных рудников и образованием провальных воронок на поверхности в 2007 г., 2010 г. и 2011 г. в районе г. Березники. Новый провал грунта размером 20×30 м зафиксирован осенью 2014 г. вблизи шахты рудника «Соликамск-2» после увеличения водопритоков

в горные выработки. Подобные случаи проявления последствий техногенеза не являются единичными и свидетельствуют о необходимости своевременной организации наблюдений за гидрогеодинамической обстановкой в районах, подверженных интенсивному техногенному освоению, в том числе и на объектах нефтегазодобывающего комплекса.

В настоящее время усовершенствование возможностей цифровой аппаратуры позволяет в широком диапазоне контролировать состояние геологической среды с высокой точностью и разрешением. В частности, повсеместное применение получил метод установки мобильных сейсмических групп для изучения инженерно-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00719).

геологических условий площадок под размещение объектов повышенного уровня ответственности, включая АЭС [3]. Прецизионный мониторинг уровня подземных вод в России проводится преимущественно в сейсмоактивных регионах с целью регистрации гидрогеосейсмических эффектов, связанных с прохождением сейсмических волн от землетрясений [6]. За рубежом результаты высокоточных измерений уровня подземных вод используются для оценки фильтрационных параметров флюидонасыщенных массивов [8, 9], анализа напряженно-деформированного состояния массива [10], зон динамического влияния разломов [11,12] и эффективности применения гидроразрыва пласта [13].

В платформенных условиях применение прецизионного мониторинга уровня подземных вод информативно для анализа состояния геологической среды, так как отсутствует влияние океанических приливов. Высокая точность проводимых наблюдений позволяет регистрировать не только эпизодические события, которые могут быть связаны с прохождением сейсмических волн от землетрясений, техногенным изменением режима водоносных горизонтов, но и гидрогеологический отклик на постоянно действующие внешние факторы – атмосферное давление, лунно-солнечные приливы [2].

Методика работ

Территория геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») расположена на правом берегу р. Лопасня в 3 км западнее д. Починки Ступинского района Московской области, на северо-восточной окраине Приокско-Террасного биосферного заповедника, вне зоны активного техногенного воздействия. Прецизионный мониторинг уровня подземных вод проводится в двух скважинах, оборудованных на разновоз-

растные водоносные горизонты, приуроченные к карбонатному коллектору трещинно-порового типа.

В первой скважине с февраля 2008 г. выполняются наблюдения за режимом напорного алексинско-протвинского водоносного горизонта, вскрытого в интервале 92–115 м [4]. Вторая скважина пройдена на расстоянии 23 м от первой и оборудована измерительным прецизионным комплексом на безнапорный каширский водоносный горизонт в интервале 42–56 м, непрерывная регистрация уровня начата с июня 2013 г.

Синхронно с регистрацией уровня подземных вод датчиком LMP 308i с частотой 1 с и точностью 0,1 мм ведется наблюдение за атмосферным давлением с точностью 0,1 гПа при помощи цифровой метеостанции. Также на территории ГФО «Михнево» развернута малоапертурная сейсмическая антенна, состоящая из трех- и однокомпонентных сейсмоприемников СМ-3КВ [5]. В центре группы в шахте на глубине 20 м установлен датчик STS-2. За последние 6 лет сформирована единая база барометрических, гидрогеологических и сейсмических данных.

Первичная обработка заключалась в 5-минутной децимации гидрогеологических данных, очистке сигнала от влияния атмосферного давления и последующей фильтрации в диапазонах 11–13 часов и 23–25 часов для выделения полусуточной и суточной приливных волн. Применение методики, разработанной в ИДГ РАН [7] и учитывающей гравитационные свойства сейсмометра, позволяет повысить чувствительность сейсмоприемников STS-2 и СМ-3 в частотном диапазоне приливных волн. Дополнительно приливы в смещении грунта по вертикальной компоненте рассчитаны с использованием программного пакета ETERNA 3.0 применительно к

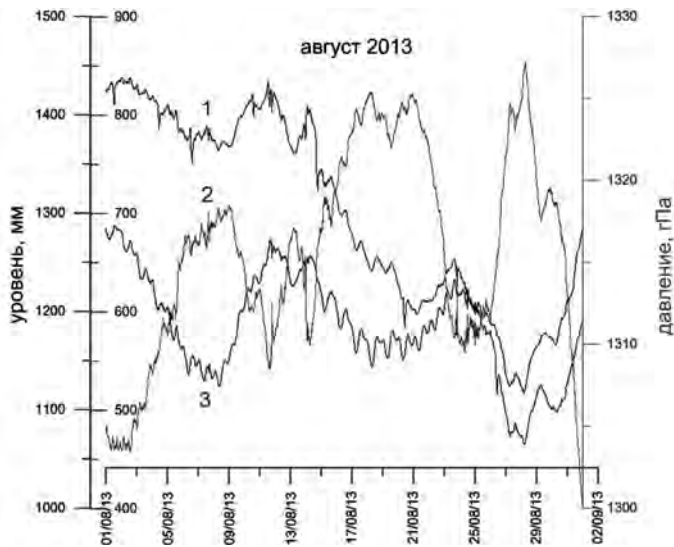


Рис. 1. Диаграммы изменения атмосферного давления (линия 2) и уровней подземных вод в наблюдательных скважинах 1 (линия 3) и 2 (линия 1)

координатам ГФО «Михнево».

Приливы, выделенные в уровне подземных вод и в смещении грунта, могут рассматриваться в качестве зондирующего сигнала, для диагностики состояния флюидонасыщенного коллектора.

Результаты исследований

На первом этапе обработки полученные ряды гидрогеологических, барометрических и сейсмических данных систематизируются и формируются в единую базу данных с построением ежемесячных графиков изменений уровня подземных вод и атмосферного давления. На представленном рис. 1 видно, что уровень подземных вод изменяется в противофазе по отношению к атмосферному давлению. На участках, характеризующихся квазистационарным режимом фильтрации, по скважине 1, вскрывающей нижезалегающий напорный водоносный горизонт, прослеживаются полусуточные и суточные приливные вариации уровня (на рис. 1). По скважине 2 слабо выражены суточные приливы.

По результатам спектрального анализа амплитуд приливов в уровне напорного водоносного горизонта выделяются основные типы волн лунного и лунно-солнечного типов (рис. 2). Данный горизонт является информа-

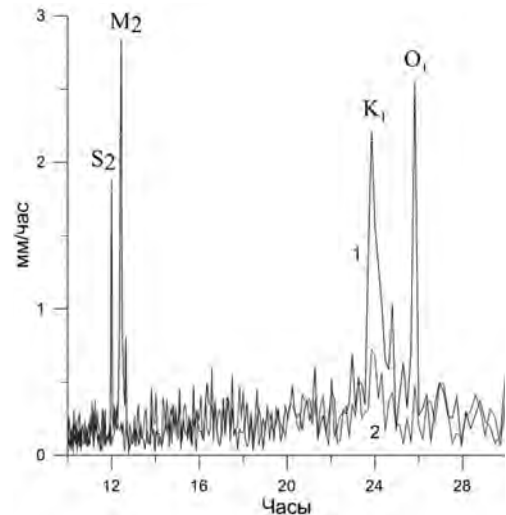


Рис. 2. Амплитудные спектры приливов в уровне подземных вод, очищенном от атмосферного давления: линия 1 – по данным скважины 1, линия 2 – по данным скважины 2

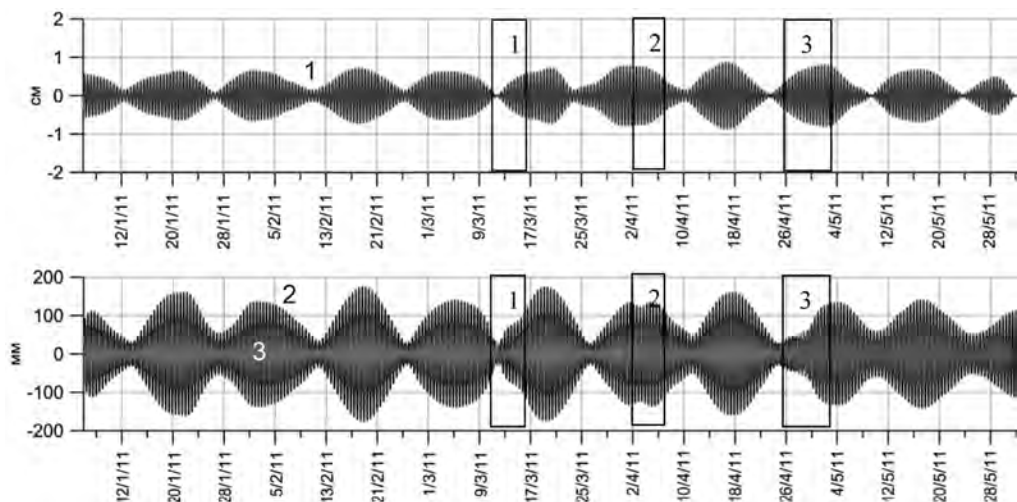


Рис. 3 Динамика полусуточной приливной компоненты в уровне подземных вод (линия 1), смещении грунта, рассчитанного по данным STS-2 (линия 2) и по программе ETERNA 3.0 (линия 3)

тивным для изучения гидрогеологического отклика на земные приливы. В верхнем безнапорном водоносном горизонте прослеживается только усиление сигнала в диапазоне суточных приливных волн. Режим верхнего безнапорного горизонта, вскрытого в скважине 2, осложнен техногенным влиянием, связанным с проведением откачек из технической скважины, расположенной на расстоянии до 0,8 км вниз по направлению подземного потока. На записи регистрируется формирование депрессионных воронок в виде снижения уровня при включении насоса и последующего восстановления после остановки насоса (рис. 1).

Глубина депрессионной воронки зависит от продолжительности эксплуатации водоносного горизонта. По данным мониторинга за выбранный период наблюдений с 01.06.2013 г. по 05.12.2013 г. максимальное снижение уровня составило 34,2 мм при продолжительности откачки 3,6 часа. Значение задержки изменения уровня в наблюдательной скважине определяется по разнице времени между началом регистрации снижения уров-

ня воды и включения насоса по датчику СМ-3, расположенному на расстоянии 10 м от технической скважины. На протяжении полугода наблюдений скорость распространения гидрогеологического отклика на техногенное возмущение варьирует от 2 м/с до 8 м/с при изменении мощности безнапорного водоносного горизонта до 2 м.

Полученные значения времени задержки могут быть использованы для предварительной оценки коэффициента уровняпроводности пласта. Последующее сопоставление результатов наблюдений за формированием и параметрами депрессионной воронки послужит основой для расчета фильтрационных параметров безнапорного водоносного горизонта по временным графикам прослеживания снижения и восстановления уровня подземных вод.

В качестве примера комплексной обработки экспериментальных данных уровня подземных вод, очищенного от атмосферного давления, и смещения грунта выбран период наблюдений с 6.01.2011 по 31.05.2011 г. За рас-

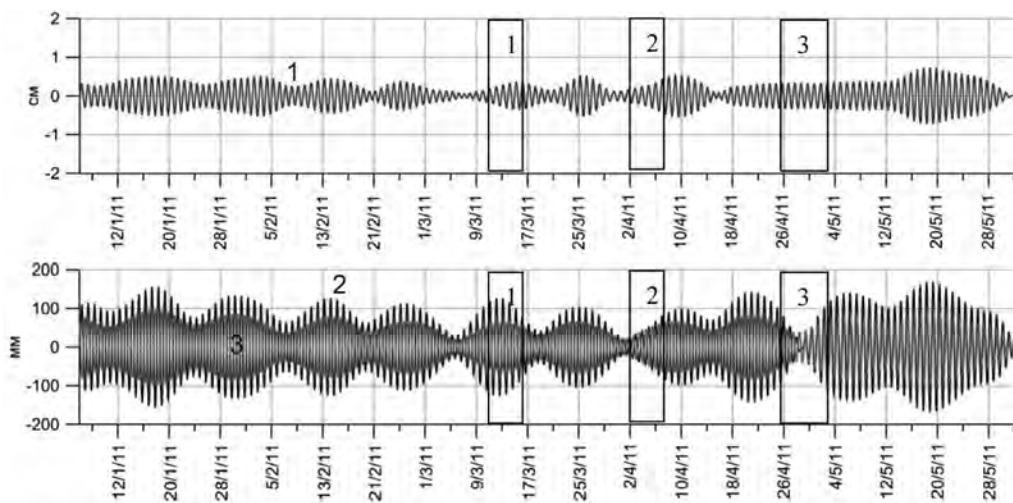


Рис. 4 Динамика суточной приливной компоненты в уровне подземных вод (линия 1), смещении грунта, рассчитанного по данным STS-2 (линия 2) и по программе ETERNA 3.0 (линия 3)

смаатриваемый период по полусуточной компоненте, выделенной в смещении грунта и уровне подземных вод полосовым фильтром 11–13 часов, прослежено усиление сигнала в марте (рис. 3). По суточной компоненте, отфильтрованной в диапазоне 23–25 часов, напротив, амплитуда отклика в смещении грунта и уровне подземных вод уменьшается (рис. 4). Амплитуды приливов в смещении грунта по полусуточной и суточной приливным волнам изменяются неравномерно относительно теоретических значений и в среднем в 1,7 раз больше относительно теоретических значений.

В рассматриваемых данных выделяются участки (1–3 на рис. 3, 4), в пределах которых прослеживается расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями приливов в смещении грунта, которое отмечается и в уровне подземных вод. Фрагментарное «искажение» сигнала может быть связано с влиянием дополнительных факторов. Четко прослеживается отклик геологической среды на землетрясение Тохоку 11.03.2011 г. [1]. Для полусуточной компоненты в пери-

од 11–12 марта 2011 г. зарегистрировано уменьшение амплитуд приливов в смещении грунта ниже теоретических значений с последующим незначительным увеличением с 13 по 15 марта 2011 г. (участок 1 рис. 3).

По экспериментальным данным наибольшие расхождения зафиксированы по приливам в смещении грунта не только в периоды форшоковой и афтершоковой активности, связанной с землетрясением 11 марта 2011 г., но и 2–6 апреля (участок 2) и с 26 апреля по 4 мая 2011 г. (участок 3). В периоды 2–4 апреля и 27–29 апреля 2011 г. по полусуточной приливной компоненте в смещении грунта выделены интервалы уменьшения амплитуд приливов. В последнем случае диапазон вариаций амплитуд полусуточной и суточной приливных компонент по сейсмическим данным ниже теоретических значений.

При сопоставлении экспериментально полученных значений смещения грунта (линия 2) с теоретическими (линия 3) по полусуточной компоненте отмечаются участки с асимметричной формой сигнала с 20 по 23 января и с 1 по 4 февраля 2011 г., которые,

вероятно, указывают на изменение деформационных свойств коллектора.

На представленных диаграммах огибающие приливов в уровне подземных вод в целом соответствуют вариациям приливов в смещении грунта (рис. 3, 4). Вместе с тем гидрогеологический отклик отличается модуляцией сигнала. По полусуточной приливной компоненте наиболее выражено смещение экстремумов приливов в уровне подземных вод относительно огибающей, построенной по теоретически рассчитанным значениям смещения грунта по вертикальной компоненте.

Дополнительно по полусуточной и суточной приливным волнам в уровне подземных вод выделяются участки рассинхронизации гидрогеологического отклика на земные приливы относительно теоретических и экспериментальных гармоник приливов в смещении грунта, свидетельствующие о дополнительном влиянии локальных факторов, связанных с изменением условий питания и разгрузки водоносного горизонта. В частности, суточная приливная волна в уровне подземных вод с 22 апреля по 8 мая 2011 г. в период максимального подъема уровня слабо выражена относительно приливной волны в смещении грунта. Наличие подобных (аномальных) участков, предположительно, свидетельствует о дополнительном влиянии гидродинамического фактора на формирование приливов в воде.

Для участков, не осложненных внешними помехами, в соответствии с теорией пороупругости запаздывание приливных волн в уровне подземных вод относительно смещения грунта может быть использовано для оценки водопроницаемости и проницаемости флюидонасыщенного коллектора.

Заключение

На современном этапе исследований возрастает актуальность организации и проведения прецизионного мониторинга уровня подземных вод в режиме он-лайн на участках, вовлеченных в сферу интенсивного освоения при разработке месторождений и промышленном освоении подземного пространства. Одним из информативных методов исследований состояния флюидонасыщенного коллектора является анализ вариаций приливных волн в гидрогеологических и сейсмических данных. По результатам прецизионного мониторинга, проводимого на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», выделены интервалы осложнения (искажения) гармоник приливных волн в смещении грунта и уровне подземных вод относительно теоретически рассчитанных параметров, в пределах которых возможна активизация природно-техногенных процессов, связанных как с изменением режима деформирования массива, так и с подземными водами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Свинцов И.С. Реакция подземных вод на удаленные сейсмические события / Всероссийская конференция с международным участием «Проблемы сейсмоtectоники». – Воронеж: Научная книга. 2011. – С. 153–157.

2. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С. Влияние лунно-солнечных приливов на уровень подземных вод по данным ГФО ИДГ

РАН «Михнево» / Динамические процессы в геосферах. Сборник научных трудов ИДГ РАН. Вып. 4. – М.: ГЕОС, 2013. – С. 174–183.

3. Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Санина И.А., Волосов С.Г., Иванченко Г.Н., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Усольцева О.А. Сейсмологический мониторинг проектируемой площадки Нижегородской АЭС с использованием малоапертурной группы / Динамические процессы в геосфе-

рах. Сборник научных трудов ИДГ РАН. Вып. 3. – М.: ГЕОС, 2012. – С. 57–65.

4. Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории геофизической обсерватории «Михнево» / Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. Сборник научных трудов ИДГ РАН. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 52–62.

5. Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Асминг В.Э., Солдатенков А.М., Ризниченко О.Ю. Синтез и опыт экспериментального применения двухмерной малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» / Сейсмические приборы. Вып. 44. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 3–18.

6. Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. – Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. – 480 с.

7. Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Беседина А.Н. Об оценке смещения и деформации в приливных волнах по цифровым записям сейсмометров STS-2 и КСЭШ-Р // Сейсмические приборы. – 2011. – Т. 47. – № 3. – С. 13–18.

8. Hsieh P.A., Bredehoeft J.D., Farr J.M. Determination of aquifer transmissivity from

Earth tide analysis // Water Resources Research. 1987. V. 23. N. 10. P. 1824–1832.

9. Rojstaczer S. Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // Journal of Geophysical Research. 1988. V. 93. N. B11. P. 13619–13634.

10. Lai G., Ge H., Wang W. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 2013. V. 118. P. 1904–1924. doi:10/1002/jgrb.50165.

11. Burbey T.J., Hisz D., Murdoch L.C., Zhang M. Quantifying fractured crystalline-rock properties using well tests, earth tides and barometric effects // Journal of Hydrology. 2012. V. 414–415. P. 317–328.

12. Xue L., Li H.-B., Brodsky E.E., Xu Z.-Q., Kano Y., Wang H., Mori J.J., Si J.-L., Pei J.-L., Zhang W., Yang G., Sun Z.-M., Huang Y. Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone // Science. 2013. V. 340. P. 1555–1559.

13. Burbey T.J., Zhang M. Assessing hydrofracturing success from Earth tide and barometric response // Ground water. 2010. V. 48. N. 6. P. 825–835. **ИДГ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Беседина Алина Николаевна – кандидат физико-математических наук,

научный сотрудник, e-mail: besedina.a@gmail.com,

Виноградов Евгений Александрович – кандидат физико-математических наук,

научный сотрудник, e-mail: gian.vin@gmail.com,

Горбунова Элла Михайловна – кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник, e-mail: emgorbunova@bk.ru,

Кабыченко Николай Васильевич – кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, e-mail: n.kabychenko@mail.ru,

Свинцов Игорь Степанович – кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, e-mail: svintsov svintsov@idg.chph.ras.ru,

Институт динамики геосфер РАН.

UDC 556.332.52:551.466.7

STATE OF FLUID-SATURATED RESERVOIR ACCORDING TO PRECISE MONITORING OF UNDERGROUNDWATER LEVEL

*Besedina A.N.*¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher,

e-mail: besedina.a@gmail.com,

*Vinogradov E.A.*¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher,

e-mail: gian.vin@gmail.com,

*Gorbunova E.M.*¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Senior Researcher, e-mail: emgorbunova@bk.ru,

*Kabychenko N.V.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

e-mail: n.kabychenko@mail.ru,

*Svintsov I.S.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: svintsov svintsov@idg.chph.ras.ru,

¹ Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, 119334, Moscow, Russia.

Fluid collector state is investigated in paper with contemporary analysis of diurnal and semidiurnal tidal waves that are picked out in ground displacement and water level variations as a result of seismic and precision hydrological monitoring in the GPO "Mikhnevo" area. In terms of combined analysis of experimental and theoretical data of ground displacement we show possibility of this method for separating periods that are complicated with extra factors influence from periods that are typical for relatively stable terms of underground water filtration with poroelastic collector deformation.

Key words: fluid-saturated reservoir, precise monitoring, undergroundwater level, tidal waves, ground displacement, faze shift, cone of depression.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 14-17-00719.

REFERENCES

1. Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Kabychenko N.V., Kocharyan G.G., Svintsov I.S. *Vserossiiskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Problemy seismotektoniki»* (Russian conference with international part «Seismotectonic problem»). Voronezh, Nauchnaya kniga, 2011, pp. 153–157.
2. Gorbunova E.M., Besedina A.N., Vinogradov E.A., Kabychenko N.V., Svintsov I.S. *Dinamicheskije protsessy v geosferakh. Sbornik nauchnykh trudov IDG RAN. Vyp. 4* (Dynamic processes in the Geospheres. Collection of IDG scientific proceeding. Issue 4), Moscow, GEOS, 2013, pp. 174–183.
3. Kishkina S.B., Loktev D.N., Sanina I.A., Volosov S.G., Ivanchenko G.N., Konstantinovskaya N.L., Nesterkina M.A., Usoltseva O.A. *Dinamicheskije protsessy v geosferakh. Sbornik nauchnykh trudov IDG RAN. Vyp. 3* (Dynamic processes in the Geospheres. Collection of IDG scientific proceeding Issue 3), Moscow, GEOS, 2012, pp. 57–65.
4. Kocharyan G.G., Gorbunova E.M., Kopylova G.N., Pavlov D.V., Svintsov I.S. *Lokal'nye i global'nye proyavleniya vozdeystvii na geosfere. Sbornik nauchnykh trudov IDG RAN* (Local and global impacts at the Geospheres. Collection of IDG scientific proceeding), Moscow, GEOS, 2008, pp. 52–62.
5. Sanina I.A., Volosov S.G., Chernykh O.A., Asming V.E., Soldatenkov A.M., Riznichenko O.Yu. *Seismicheskie pribory. Vyp. 44* (Seismic equipment. Issue 44), Moscow, IFZ RAN, 2008, pp. 3–18.
6. *Seismologicheskie i geofizicheskie issledovaniya na Kamchatke. K 50-letiyu detal'nykh seismologicheskikh nablyudeni* (Seismological and geophysical investigations in Kamchatka. For 50-anniversary detail seismological observations), Petropavlovsk-Kamchatsky, Novaya kniga, 2012, 480 p.
7. Kabychenko N.V., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., Besedina A.N. *Seismicheskie pribory. 2011, vol. 47, no 3*, pp. 13–18.
8. Hsieh P.A., Bredehoeft J.D., Farr J.M. Determination of aquifer transmissivity from Earth tide analysis. *Water Resources Research. 1987. V. 23. N. 10. P. 1824–1832.*
9. Rojstaczer S. Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level. *Journal of Geophysical research. 1988. V. 93. N. B11. P. 13619–13634.*
10. Lai G., Ge H., Wang W. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 2013. V. 118. P. 1904–1924. doi:10/1002/jgrb.50165.*
11. Burbey T.J., Hisz D., Murdoch L.C., Zhang M. Quantifying fractured crystalline-rock properties using well tests, earth tides and barometric effects. *Journal of Hydrology. 2012. V. 414–415. P. 317–328.*
12. Xue L., Li H.-B., Brodsky E.E., Xu Z.-Q., Kano Y., Wang H., Mori J.J., Si J.-L., Pei J.-L., Zhang W., Yang G., Sun Z.-M., Huang Y. Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone. *Science. 2013. V. 340. P. 1555–1559.*
13. Burbey T.J., Zhang M. Assessing hydrofracturing success from Earth tide and barometric response. *Ground water. 2010. V. 48. N. 6. P. 825–835.*

